МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 625.54, 625.57 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21

Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро»[*]

И. А. Лагерев[1], А. В. Лагерев[2], А. В. Панфилов[3], Э. В. Марченко[4]**
[1,2] Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, г. Брянск, Российская Федерация
[3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Cabin dynamics simulation of “Rope Metro” transport system [***]

I. A. Lagerev[1], A. V. Lagerev[1], A. V. Panfilov[3], E. V. Marchenko[4]**
[1,2] Ivan Petrovsky Bryansk State University, Bryansk, Russian Federation
[3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Представлены материалы по исследованию возможностей использования пассажирских канатных дорог (ПКД) в условиях сильно урбанизированной городской среды. Статья посвящена вопросам разработки математических моделей для проектирования и моделирования рабочих процессов перспективной транспортной системы «Канатное метро». Представленная транспортная система существенно отличается от традиционной ПКД, причем для ее успешного проектирования разработана математическая модель оценки эксплуатационной нагруженности основных элементов. Также авторами предложена математическая подмодель пассажирской кабины канатного метро, которая в дальнейшем будет интегрирована в состав комплексной математической модели системы. Целью работы являлось исследование колебаний пассажирской кабины при ее движении вдоль участка транспортной системы.
Материалы и методы. Предложена новая математическая модель, описывающая колебания пассажирской кабины и элементов ее подвески. Данная модель будет интегрироваться в состав комплексной математической модели транспортной системы, используя часть ее выходных параметров. Проведено численное моделирование движения кабины. Выведенные уравнения представляют собой математическую модель для исследования динамики маятниковых колебаний пассажирской кабины перспективной транспортной системы «Канатное метро». В данной работе интегрирование уравнений выполнено методом Рунге-Кутта в программном комплексе собственной разработки.
Результаты исследования. Разработаны новые математические модели и программное обеспечение для численного моделирования. Продемонстрировано влияние демпферных устройств на величину максимальных колебаний пассажирской кабины при движении.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и моделировании рабочих процессов, оптимизации элементов транспортной

Introduction. The study results of the passenger ropeways (PRW) applicability in the highly urbanized environment are presented. Issues on the development of mathematical models for designing and simulating work processes of the advanced “Rope Metro” transport system are considered. The proposed transport system differs significantly from the customary PRW. For its successful design, a mathematical model for estimating the operational loading of the key components is developed. Likewise, a mathematical submodel of the passenger cabin of the cable car which will be then integrated into the composite mathematical model of the system is offered by the authors. The work objective is to study the passenger cabin oscillations during its movement along the section of the transport system.
Materials and Methods. A new mathematical model describing the oscillations of the passenger cabin and its suspension members is proposed. This model should be integrated into the composite mathematical model of the transport system using part of its output capacity. Numerical simulation of the cabin movement is carried out. The derived equations represent a mathematical model for studying the dynamics of the pendular oscillations of the passenger cabin of the advanced “Rope Metro” transport system. In the paper, the integration of the equations is carried out by the Runge-Kutta method in the program package of the in-home design.
Research Results. New mathematical models and software for the numerical simulation are developed. The damping devices’ effect on the maximum oscillation amplitude of the passenger cabin is shown.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used under designing and modeling work processes, and optimizing

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: lagerev-bgu@yandex.ru, avl-bstu@yandex.ru, panfilov@ikcmysl.ru, daedwardrambler.ru@mail.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

системы. Доказано, что демпфирующее устройство снижает амплитуду колебаний, которые после окончания переходного процесса стабилизируются на более низких значениях (0,3–0,5 градуса). В дальнейшем необходима интеграция разработанной математической модели в комплексную модель исследуемой системы с целью уточнения полученных выводов.

the transport system components. It is proved that the damping device reduces the amplitude of the oscillations which stabilize at lower values (0.3-0.5 degrees) after the transient process end. In the future, it is required to integrate the developed mathematical model into a composite model of the system under investigation to refine the conclusions reached.

Ключевые слова: подвесная пассажирская канатная дорога, канатное метро, пассажирская кабина, динамика, колебания, моделирование.

Keywords: aerial passenger ropeway, cable metro, passenger cabin, dynamics, oscillations, simulation.

Образец для цитирования: Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро / И. А. Лагерев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 16−21.

For citation: I.A. Lagerev, A.V. Lagerev, A.V. Panfilov, E.V. Marchenko, A.A. Korotky. Cabin dynamics simulation of "Rope Metro" transport system. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 16−21.

Введение. Использование пассажирских канатных дорог (ПКД) в условиях сильно урбанизированной городской среды является перспективным [1]. Однако решения, основанные на прямом использовании ПКД, предназначенных для перевозки туристов в горной местности, не подходят для применения в качестве полноценного вида городского транспорта. Это связано с невозможностью маршрутизации отдельных пассажирских кабин, низкой пропускной способностью системы, невозможностью построения трассы достаточной протяженности (свыше 2–3 км) [1–3].

Для решения этих проблем авторами предложена инновационная система городского транспорта «Канатное метро» [3–5]. Конструктивно канатное метро состоит из концевых и промежуточных станций, соединенных между собой путями из одного тягового и нескольких несущих канатов. На несущих канатах подвешены пассажирские кабины вместимостью 20–40 пассажиров. Тележки кабин приводятся в движение тяговым канатом, связанным с дискретным приводом. Посадочные станции оборудованы конвейерами для пассажирских кабин, а между станциями установлены промежуточные опоры с балансирами. Они поддерживают стальные канаты, высота закрепления которых варьируется в зависимости от рельефа местности и высоты строений, расположенных под трассой движения. Все станции установлены на арочных опорах над проезжими частями улиц с сохранением под ними габаритов для движения городского автотранспорта и соединены с другими станциями в каждом направлении двумя независимыми путями из несущих и тягового канатов. Тяговый канат опирается на ролики балансиров, а специальные конвейеры пересадочных станций оборудованы системой переадресации пассажирских вагонов на другие пути движения [3–5].

Система состоит из мехатронных модулей, управляемых единой системой автоматического управления (САУ). Тяговый канат приводится в движение тяговыми модулями, образующими распределенный привод. Кабины, подвешенные на несущих элементах (канатах или рельсах), приводятся в движение тяговым канатом через управляемый захват. В системе выполняется маршрутизация кабин конвейерами станций и стрелочными переводами [3–5].

Важным отличием вышеописанной системы от ПКД является отсутствие жесткой привязки пассажирских кабин к тяговым и несущим канатам. На протяженных линейных участках вес кабин воспринимается несущими канатами, а на участках резкого изменения направления трассы (изгиб, стрелочный перевод) кабины переходят с канатов на жесткие опорные конструкции (рельсы). На станциях кабины движутся не только по рельсам, но и по конвейерам. Система таких участков формирует трассу движения кабин. По пути движения кабины управляемыми захватами цепляются к тяговым канатам, приводимым в движение тяговыми модулями, образующими распределенный привод. Такая конструкция трассы позволяет организовать движение, схожее с движением автобусов (при наличии большого количества стрелочных переводов и конвейеров станций) или поездов метро (более простой вариант). При необходимости пассажирская кабина перенаправляется на тот или иной участок трассы, подобно тому, как автобус сворачивает на нужную улицу. При наличии впереди препятствия кабина отцепляется от тягового каната и затормаживается так же, как поезд метро останавливается в туннеле при занятом впереди перегоне.

Так как данная транспортная система существенно отличается от традиционной ПКД, то для ее успешного проектирования требуется разработка математических моделей оценки эксплуатационной нагруженности основных элементов.

В силу высокой сложности модели рекомендуется ее построение с использованием методологии, изложенной в

работе [6]. В рамках данного подхода каждому элементу системы ставится в соответствие математическая подмодель, входящая в состав комплексной математической модели. Отдельные подмодели связаны между собой через совместные параметры (перемещения, скорости, ускорения, деформации, усилия и т. д.). Получаемые с использованием математических подмоделей уравнения движения численно интегрируются в программном комплексе собственной разработки [6].

В данной работе предложена математическая подмодель пассажирской кабины канатного метро, которая в дальнейшем будет интегрирована в состав комплексной математической модели системы.

Материалы и методы. Расчетная схема движения кабины канатного метро приведена на рис. 1. При движении кабины вдоль пролета в нормальном эксплуатационном режиме движущее усилие создается тяговым канатом, к которому кабина крепится с помощью автоматического захвата [4]. Со стороны тягового каната на кабину действуют усилия T_1 и T_2. Приводной модуль оснащается электроприводом, который создает движущее усилие $T_{пр}$. В нормальном режиме $T_{пр}=0$.

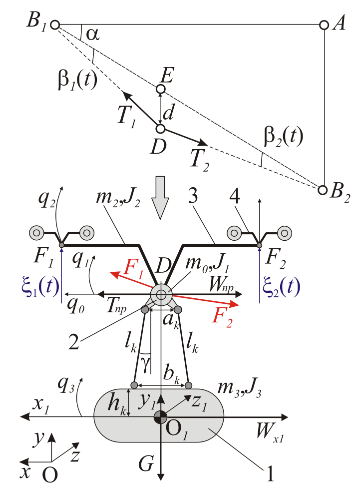


Рис. 1. Расчетная схема движения пассажирской кабины:
1 — пассажирская кабина; 2 — приводной модуль; 3 — большой балансир;
4 — малый балансир

Fig. 1. Calculation scheme of the passenger cabin movement:
1 - passenger cabin; 2 - drive module; 3 - large equalizer;
4 - small equalizer

Для осуществления движения кабины в заданном направлении (вдоль положительного направления координаты q_0) должно выполняться условие:

$$T_1 cos(\beta_1) + T_{пр} > T_2 cos(\beta_2) + W,$$

где W — равнодействующая сил сопротивления движению.

Сила сопротивления движению включает ряд компонентов:

$$W = W_x + W_v + W_{x1} + W_{пр},$$

причем W_x — сила сопротивления вдоль оси x глобальной системы координат, например, вес, ветровая нагрузка, Н; W_v — силы, связанные с обобщенными скоростями (кориолисовы и центробежные силы), Н; W_{x1} — приведенные к оси x силы сопротивления, действующие вдоль осей системы координат, связанной с пассажирской кабиной, Н; $W_{пр}$ — тормозное усилие, развиваемой тормозом и электроприводом в тормозном режиме, Н.

При анализе динамики одиночной пассажирской кабины были приняты нижеперечисленные допущения.

1. Несмотря на то, что d — это прогиб несущего каната, считаем, что тяговый канат также занимает соответствующее положение, поэтому усилия в тяговом канате можно считать направленными вдоль упругой линии несущего каната с углами наклона $\beta_1(t)$, $\beta_2(t)$, установленными с помощью математической модели несущего каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [6].

2. Считаем, что тяговый канат гарантированно создает положительное движущее усилие, т. е. $T_2=0$, а величина T_1 установлена с использованием модели тягового каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [6–7].

3. Балансиры и элементы подвески пассажирской кабины являются абсолютно жесткими телами. Из этого следует, что координата пассажирской кабины вдоль трассы канатного метро полностью определяется координатой приводного модуля q_0. Следует отметить, что силы сопротивления зависят от текущего положения пассажирской кабины (q_0) и балансира (q_2).

4. Движение малых балансиров подробно не рассматривается.

Таким образом, рассматриваемая динамическая система имеет следующие обобщенные координаты: q_0, q_1, q_2, q_3. Последние три координаты полностью определяют конфигурацию кабины и ее подвески.

Местоположение кабины в пределах участка линии канатного метро q_0 можно определить, проинтегрировав уравнение движения кабины

$$m_k \ddot{q}_0 = T_1 \cos(\beta_1) + T_{np} - T_2 \cos(\beta_2) - W, \quad (1)$$

где полная масса кабины $m_k = m_0 + m_2 + m_3$; m_0 — масса приводного модуля, кг; m_2 — масса системы балансиров, кг; m_3 — масса кабины, кг.

Кабина подвешена на рычагах длиной $l_к$. Естественный угол отклонения этих рычагов от вертикали (при горизонтальном положении подвески) равен γ. Таким образом, геометрическая схема подвески кабины представляет собой трапецию с основаниями $a_к$ и $b_к$. При движении кабины происходит изменение положения элементов ее подвески. При этом крепление подвески к приводному модулю поворачивается на угол q_1, а кабина — на угол q_3.

Начальный перекос системы балансиров кабины определяется в зависимости от вертикальных положений точек F_1 и F_2. Изменение их положений задается законами $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$, установленными с помощью математической модели несущего каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [6].

Итоговое перемещение точки D составляет:

$$\Delta D = 0{,}5(\xi_1(t) + \xi_2(t)).$$

Угол наклона большого балансира к горизонту, вызванный различным положением точек F_1 и F_2:

$$q_{2\xi}(t) = a\tan\left[\frac{\xi_1(t) - \xi_2(t)}{L_1}\right],$$

где L_1 — размер большого балансира.

Уравнение поворота приводного модуля имеет вид:

$$J_1 \ddot{q}_1 = M_1 - M_{w1}, \quad (2)$$

где M_1 — момент сил, вызывающих поворот приводного модуля, Н·м; M_{w1} — момент сил сопротивления повороту балансира, Н·м;

$$M_1 = \frac{G\alpha_k}{4}\cos(\gamma + q_3) - W_{x1}(l_k \cos(\gamma) + h_k)\sin(q_3) - W_x(l_k \cos(\gamma) + h_k),$$

$$M_{w1} = k_{w1} M_1,$$

где k_{w1} — коэффициент трения в шарнире D.

Уравнение движения большого балансира:

$$q_2(t) = q_{2\xi}(t) \quad (3)$$

Уравнение движения пассажирской кабины:

$$J_3 \ddot{q}_3 = -M_1. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) представляют собой математическую модель для исследования динамики (маятниковых колебаний) пассажирской кабины перспективной транспортной системы «Канатное метро». В данной работе интегрирование уравнений выполнялось методом Рунге-Кутта в программном комплексе собственной разработки.

Результаты исследования. Результаты моделирования динамики пассажирской кабины массой 1 т при движении по горизонтальному участку трассы приведены на рис. 2.

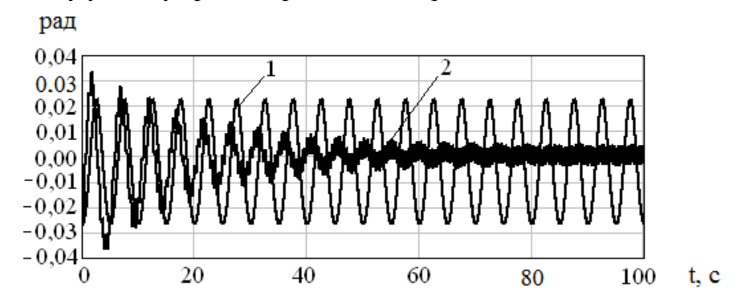


Рис. 2. Угловые колебания кабины транспортной системы:
1 — без учета демпфирования; 2 — с учетом демпфирования (при α=10 Н·с)

Fig. 2. Angular vibrations of transport system cab:
1 - without damping; 2 - with allowance for damping (for α = 10 N · s)

Видно, что амплитуды колебаний достигают 2–3 градусов, что недопустимо с точки зрения обеспечения плавности хода и безопасности эксплуатации. Поэтому в конструкцию подвески кабины дополнительно

вводятся гидравлические демпферы. Их влияние учитывается добавлением в уравнение (4) момента вязких сил αq_3, где α — коэффициент вязкости демпфера подвески.

Обсуждение и заключения. Авторами доказано, что демпфирующее устройство снижает амплитуду колебаний, которые после окончания переходного процесса стабилизируются на более низких значениях и составляют 0,3–0,5 градуса. Авторами планируется интеграция разработанной математической модели в комплексную модель исследуемой системы с целью уточнения полученных выводов.

Библиографический список

1. Короткий, А. А. Перспективы применения канатного транспорта в урбанизированной среде / А. А. Короткий, М. В. Кирсанов, А. В. Панфилов // Градостроительство. — 2013. — № 4. — С. 66–70.

2. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А. В. Лагерев [и др.] // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. — 2012. — № 3. — С. 12–15.

3. Лагерев, А. В. Перспективы внедрения инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог для модернизации системы общественного транспорта города Брянска / А. В. Лагерев, И. А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского гос. ун-та. — 2017. — № 2. — С. 163–177.

4. Транспортная система («Канатное метро») : патент 120617 Рос. Федерация : МПК B61B 7/00 / А. А. Короткий, А. В. Лагерев, Б. Ч. Месхи, В. М. Приходько, Г. В. Кустарев, В. Б. Маслов, Д. А. Короткий, М. В. Кирсанов, А. В. Панфилов, И. А. Лагерев. — № 2012121284/11 ; заявл. 23.05.12 ; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27. — 2 с.

5. Транспортная система («Канатное метро») : патент 2506182 Рос. Федерация : МПК B61B 7/00 / А. А. Короткий, А. В. Лагерев, Б. Ч. Месхи, В. М. Приходько и др. — № 2012121358/11 ; заявл. 23.05.12 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. — 2 с.

6. Лагерев, И. А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов / И. А. Лагерев. — Брянск : РИО БГУ, 2016. — 371 с.

7. Самсонов, А. В. Моделирование динамики мехатронного модуля гибкого тягового органа канатной дороги / А. В. Самсонов // Научно-технический вестник Брянского гос. ун-та. — 2016. — № 2. — С. 81–85.

References

1. Korotky, A.A., Kirsanov, M.V., Panfilov, A.V. Perspektivy primeneniya kanatnogo transporta v urbanizirovannoy srede. [Prospects of using cableway transport in urbanized environment.] Gradostroitel'stvo, 2013, no. 4, pp. 66–70 (in Russian).

2. Lagerev, A.V., Lagerev, I.A., Korotky, A.A., Panfilov, A.V. Kontseptsiya innovatsionnoy sistemy gorodskogo transporta «Kanatnoe metro goroda Bryanska». [Concept of the innovative urban transport system “Cableway of the City of Bryansk”.] The Bryansk State University Herald, 2012, no. 3, pp. 12–15 (in Russian).

3. Lagerev, A.V., Lagerev, I.A. Perspektivy vnedreniya innovatsionnoy tekhnologii nadzemnykh passazhirskikh perevozok na osnove podvesnykh passazhirskikh kanatnykh dorog dlya modernizatsii sistemy obshchestvennogo transporta goroda Bryanska. [Prospects of introduction of innovative technology overhead passenger traffic on the basis of the passenger ropeways for the modernization of the public transport system of the Bryansk city.] Scientific and Technical Journal of Bryansk State University, 2017, no. 2, pp. 163–177 (in Russian).

4. Korotky, A.A., Lagerev, A.V., Meskhi, B.C., Prikhodko, V.M., Kustarev, G.V., Maslov, V.B., Korotky, D.A., Kirsanov, M.V., Panfilov, A.V., Lagerev, I.A. Transportnaya sistema («Kanatnoe metro»): patent 120617 Ros. Federatsiya: MPK B61B 7/00. [Transport system (“Rope metro”).] Patent RF, no. 120617, 2012 (in Russian).

5. Korotky, A.A., Lagerev, A.V., Meskhi, B.C., Prikhodko, V.M., et al. Transportnaya sistema («Kanatnoe metro»): patent 2506182 Ros. Federatsiya: MPK B61B 7/00. [Transport system (“Rope metro”).] Patent RF, no. 2506182, 2014 (in Russian).

6. Lagerev, I.A. Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobil'nykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. [Modeling of operating processes of manipulating systems of mobile multipurpose transport-production machines and structures.] Bryansk: RIO BGU, 2016,371 p. (in Russian).

7. Samsonov, A.V. Modelirovanie dinamiki mekhatronnogo modulya gibkogo tyagovogo organa kanatnoy dorogi. [Cable Railway mechatronic drive dynamics simulation.] Scientific and Technical Journal of Bryansk State University, 2016, no. 2, pp. 81–85 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.09.2017
Сдана в редакцию 19.09.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 19.09.2017
Submitted 19.09.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Лагерев Игорь Александрович,
проректор по инновационной работе Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского (241036, г. Брянск, ул. Бежицкая, д. 14), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0921-6831, lagerev-bgu@yandex.ru

Лагерев Александр Валерьевич,
заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского (241036, г. Брянск, ул. Бежицкая, д. 14), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0380-5456, avl-bstu@yandex.ru

Панфилов Алексей Викторович,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, кандидат социологических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7211-1824, panfilov@ikcmysl.ru

Марченко Эдвард Викторович,
ассистент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7027-7716, daedwardrambler.ru@mail.ru

Authors:

Lagerev, Igor A.,
Vice-Rector for innovations, Ivan Petrovsky Bryansk State University (BSU) (RF, 241036, Bryansk, ul. Bezhitskaya, 14), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0921-6831, lagerev-bgu@yandex.ru

Lagerev, Alexander V.,
associate director on research, Research Institute for Fundamental and Applied Research, Ivan Petrovsky Bryansk State University (BSU) (RF, 241036, Bryansk, Bezhitskaya Str., 14), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0380-5456, avl-bstu@yandex.ru

Panfilov, Alexey V.,
associate professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), Cand.Sci. (Sociology), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7211-1824, panfilov@ikcmysl.ru

Marchenko, Eduard V.,
teaching assistant of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7027-7716, daedwardrambler.ru@mail.ru